

不同插值方法对精细化预报产品在青岛地区的检验比较

饶莉娟^{1,2},王健林³,张 星¹

(¹青岛市黄岛区气象局,山东青岛 266400;²青岛市气象灾害防御工程技术研究中心,山东青岛 266100;

³青岛市气象局,山东青岛 266100)

摘 要: 青岛地区农业产业园位置分散在内陆、沿海和山地等多种地形区域,气温差异大,为提高现代农业精细化服务水平,笔者基于国家气象中心下发的全国区域5 km格点气象要素预报产品,采用最近邻域、双线性插值、反距离权重3种插值方法对气温预报产品在青岛地区的适用性进行对比检验。结果表明:内陆地区双线性插值法准确率最高,且平均绝对误差和均方根误差最小。沿海地区采用最近邻域法和反距离权重法均有较好的效果。对于山地,综合考虑准确率、平均绝对误差和均方根误差,较适用反距离权重插值方法。最高气温预报准确率内陆地区高于沿海和山地地区,且在8—10月为准确率最高时期,3—6月准确率相对较低;最低气温则在沿海地区准确率最高,且夏季的准确率明显高于冬季,其在7月准确率最高而1月准确率最低。研究结果为下一步将预报产品插值生成分辨率更细、准确率更高的精细化气象服务产品奠定基础。

关键词: 青岛地区;地形;气温;气象服务;最近邻域法;双线性插值法;反距离权重法

中图分类号:P457

文献标志码:A

论文编号:casb20191000706

Different Interpolation Methods: Comparison for Refined Forecast Products in Qingdao Area

Rao Lijuan^{1,2}, Wang Jianlin³, Zhang Xing¹

(¹Huangdao Meteorological Bureau, Qingdao Shandong 266400; ²Qingdao Engineering Technology Research Center for Meteorological Disaster Prevention, Qingdao Shandong 266100; ³Qingdao Meteorological Bureau, Qingdao Shandong 266100)

Abstract: The agricultural industrial parks in Qingdao are distributed in various terrain areas such as inland, coastal and mountainous areas with large temperature differences. In order to improve the level of refined weather service for modern agriculture, we compared and tested the applicability of temperature prediction products in Qingdao by the methods of the nearest neighbor interpolation, bilinear interpolation and inverse distance weight interpolation, based on the meteorological elements prediction products of 5 km grid in the national region issued by the national meteorological center. The results show that: in inland areas, the bilinear interpolation has the highest accuracy and the minimum mean absolute error and root mean square error; the nearest neighbor interpolation and the inverse distance weighted method are both effective in coastal areas; for mountainous area, the inverse distance weighted interpolation method is more suitable considering the accuracy, mean absolute error and root mean square error; the accuracy of the maximum temperature prediction in inland areas is higher than that in coastal and mountainous areas, and the accuracy is the highest from August to October, while relatively low from March to June; but the accuracy of the minimum temperature prediction is the highest in coastal area, and it is higher in summer than that in winter, with the highest accuracy in July and the lowest accuracy in January. The results can provide a basis for producing refined weather service products with fine resolution and high accuracy.

基金项目: 2016年度青岛市青年专项“青岛市气温精细化格点预报方法研究”(2016qdxq15)。

第一作者简介: 饶莉娟,女,1987年出生,福建南平人,工程师,硕士,主要从事应用气象研究与业务服务工作。通信地址:266400 山东省青岛市黄岛区竹子山路77号 青岛市黄岛区气象局,E-mail:rao1201@163.com。

收稿日期: 2019-10-11, **修回日期:** 2019-12-27。

Keywords: Qingdao; terrain; temperature; weather service; nearest neighbor interpolation; bilinear interpolation; inverse distance weighted interpolation

0 引言

随着社会经济的快速发展和人民生活水平的逐步提高,社会各界对天气预报的时间和空间分辨率需求更加精细。气温预报是预报服务的重要组成部分,气温不仅对于干旱、霜冻、大雾等灾害天气的发生发展起到重要的作用^[1],更是农林牧渔等部门判断灾害状况的重要指标^[2]。现代农林牧渔业生产模式的发展增强了对天气变化的敏感性,即使在少雨的冬春季节里,气温变化对大面积的大棚农业生产、棉花、冬小麦生长等影响也非常大^[3-9]。同时,气候变化和城市化进展使得城郊温度差异愈发明显^[10],因此研发各种时空尺度的精细化、高频次气象服务数据已经成为当务之急。

格点预报作为精细化预报的趋势,越来越多的应用于气象预报中,许多地方相继开展基于格点的精细化要素预报^[11-15]。其中,北京市气象局建立了无缝隙智能网格分析预报系统,并制作空间分辨率为1 km的多要素预报产品^[16]。气象要素的精细化格点预报,通常采用插值方法来实现^[17-21]。Ashraf等^[22]使用不同插值方法对内布拉斯加州、堪萨斯州和科罗拉多州17个站2年逐日气象数据进行插值分析,结果是克里金插值法效果最好而距离平方反比法最差。李新等^[23]介绍了各类插值方法的适用范围、算法和优缺点,指出没有绝对最优的插值方法,必须根据研究需要选择。林忠辉等^[24]采用3种不同的插值方法对气象要素进行插值,发现没有一种插值方法可以适用于所有气象要素的插值,需要具体情况具体分析。陈锋等^[25]建立了适用于浙江地区的综合分析插值方法,并将该方法与其他方法进行比较,表明综合分析法能给出最优的格点化温度分析场,考虑高程的反距离加权法其次,最后是反距离加权法和普通克里格法。以上研究为开展青岛地区不同插值方法的适用性提供了借鉴。

青岛为海滨丘陵城市,受地形、下垫面情况复杂和海陆热力差异影响,南北区域形成比较明显的局地小气候特点,造成青岛市不同区域的气象要素有较为显著的差异。青岛现代农业产业园众多,而农作物生长发育与气象因子密切相关,异常的气象条件变化会对农业产业园区造成重大损害。因此,精细化的气象要素预报是提升农作物品质、提高农作物产量的关键条件之一。

本研究基于国家气象中心下发的全国区域5 km格点气象要素预报系统,通过双线性插值、最近邻域

法、反距离加权法3种插值方法,将格点预报场插值得到站点预报后与实况值进行比较分析,验证预报产品气温预报准确性,寻找适用于青岛地区(内陆、沿海和山地)的气温插值方法,以期为进一步将预报产品插值生成分辨率更细、准确率更高的精细化气象服务产品奠定基础,实现青岛不同区域农业产业园区的精细化气温预报,为现代农业提供有力的气象保障。

1 资料与方法

1.1 资料来源

模式资料采用国家气象中心下发的全国区域5 km格点气象要素预报系统数据,选取2018年1月1日—12月31日每日8时(北京时,下同)和20时起报逐24 h日最高和日最低温度格点资料,预报时效为0~240 h。

为确保实况资料的可靠性及完整性,实况资料采用2018年1月1日—12月31日青岛地区81个考核站点(包括7个国家级气象站和74个省局考核的自动站)地面小时气温资料(见图1)。将站点分为内陆站、沿海站和山地站3类分别代表内陆地区、沿海地区和山地地区进行对比分析,其中沿海站(包括海岛)11个,山区站7个,内陆站63个。将实况08—08时(或20—20时)内逐小时最高和最低气温求最大和最小值作为实况的最高、最低气温。

1.2 插值方法

1.2.1 最近邻域法(Nearest Neighbor, NN) 核心思想是每个样本都可以用与它最接近的相邻点来代表。也就是通过计算站点与各格点之间的距离,找出距离最小的格点并将该格点的值赋给站点。

1.2.2 双线性插值(Bilinear Interpolation, BI) 核心思想是在2个方向分别进行1次线性插值。原理是使用邻近4个格点的值,按照其距目标点的距离赋予相应的权重进行线性插值。如图2所示,P点是目标点,四周的Q点是用于插值的格点。首先在x方向进行线性插值,得到 R_1 和 R_2 的值。

$$f(R_1) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(Q_{11}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(Q_{21}) \cdots \cdots (1)$$

$$f(R_2) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(Q_{12}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(Q_{22}) \cdots \cdots (2)$$

然后在y方向进行线性插值,得到P点的值。

$$f(P) = \frac{y_1 - y}{y_2 - y_1} f(R_1) + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} f(R_2) \cdots \cdots (3)$$

1.2.3 反距离权重插值(Inverse Distance Weighted,

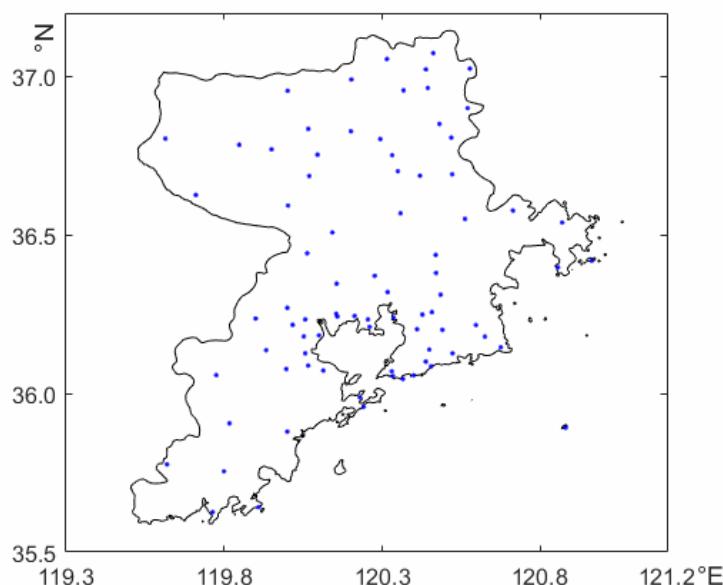


图1 青岛地区站点位置

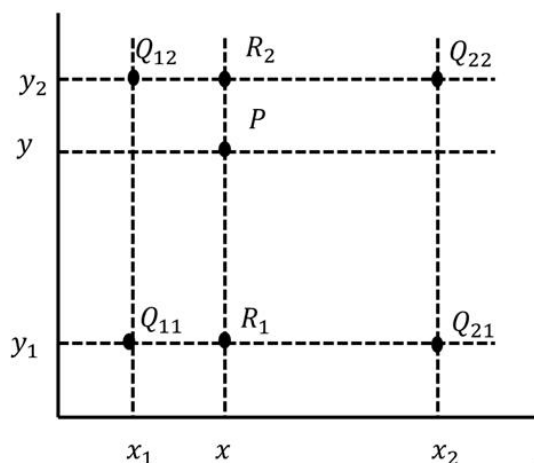


图2 双线性插值原理示意图

IDW) 也称为距离倒数乘方法,其基本思想是两个物体离得越近,它们的性质越相似,离得越远则相似性越小。它以插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均,离插值点越近的格点赋予的权重越大,为公式(4)^[26]。

$$z_0 = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{(D_i)^p} \right)^{-1} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{(D_i)^p} z_i \right) \quad (4)$$

其中, $D_i = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}$ 表示格点到插值点的距离, z_0 为插值点的值, z_i 为第 i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) 个格点的值, p 为距离的幂,常选用 $p=2$ 。

1.3 检验方法

气温预报准确率依据中国气象局下发的“中短期天气预报质量检验办法”进行检验,误差分析主要采用

平均绝对误差和均方根误差来分析。

$$\text{温度预报准确率: } TT = \frac{N_r}{N_f} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{平均绝对误差: } MEA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |G_i - T_i| \quad (6)$$

$$\text{均方根误差: } RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (G_i - T_i)^2} \quad (7)$$

式中: N_r 为预报正确的次数(预报误差绝对值 $\leq 2.0^\circ\text{C}$ 时记为预报正确), N_f 为预报的总次数, G_i 为插值后的预报值, T_i 为站点的观测值, N 为总样本数。

文章采用 Matlab 软件编程实现以上 3 种算法,并对数据进行处理和分析。

2 结果与分析

2.1 不同插值方法预报时效准确率检验

对 2018 年 1 月 1 日—12 月 31 日青岛市 81 个站点进行 1~10 天(即 0~240 h)的预报时效准确率检验分析,对比最近邻域法、双线性法和反距离权重法的插值效果。由 3 种插值方法在 3 种站点类型的最高气温预报准确率(见图 3)可以看出(以 8 时起报为例,20 时起报结果类似不再赘述,下同),内陆站点的预报准确率高于沿海和山地站点。对于预报未来 1 天的最高气温,3 种插值方法在内陆站点预报准确率均为 70% 以上,而沿海站点准确率在 64.9%~65.6% 之间,山地站点准确率在 65.5%~67.5% 之间。预报准确率随着预报时效的增加而逐渐降低。对内陆站点来说,双线性插值法在 1~10 天预报时效中的准确率均高于其他 2 种插值方法。对于沿海站点,3 种插值方法准确率的差异较

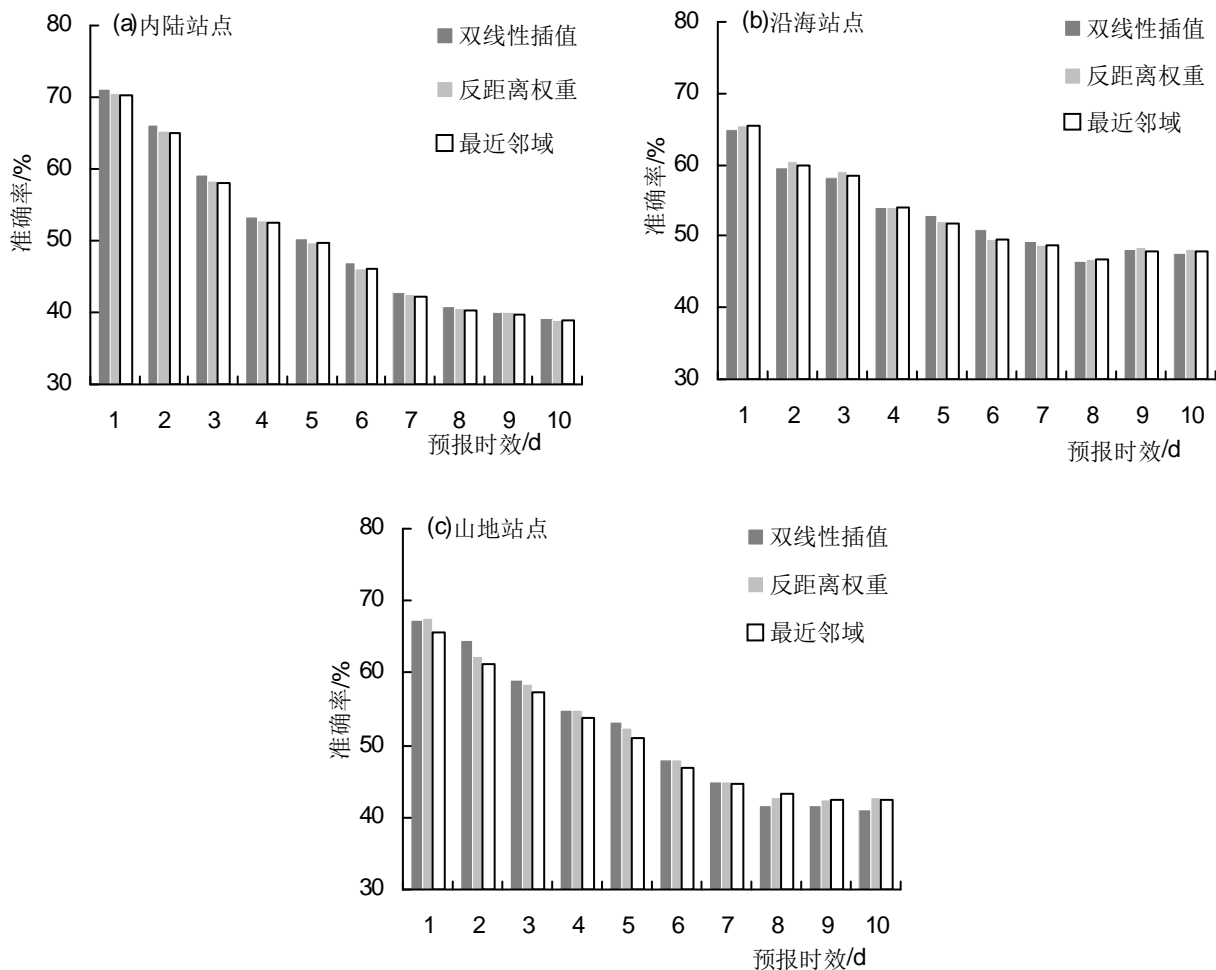


图3 3种插值方法在不同站点类型最高气温的预报准确率

小,在预报第1天最近邻域法准确率较高,而在第2~第4天和第8~第10天则为反距离权重法准确率较高,第5~第7天为双线性插值法较高。对于山地站点,在预报第1天反距离权重法准确率稍高,而在第2~第7天则为双线性插值法较高,第8~第10天为最近邻域法稍高。

由3种插值方法在3种站点类型的最低气温预报准确率(见图4)可以看出,整体而言,最低气温的预报准确率高于最高气温。最低气温的预报,沿海站点的准确率高于其他2种站点类型,这是由于沿海站点受海洋调节影响,最低气温变化相对较小,而内陆站点和山地站点受下垫面或辐射降温的影响,最低气温变化差异大导致准确率降低。对于预报未来1天的最高气温,3种插值方法在内陆站点预报准确率在68.4%~70.0%之间,沿海站点准确率在71.6%~75.7%之间,山地站点准确率在62.0%~69.8%之间。对内陆站点来说,双线性插值法在1~10天预报时效中的准确率均高于其他2种插值方法。对于沿海站点,最近邻域法和反距离权重法准确率较为接近,在预报第1~7天预报

时效中最近邻域法准确率稍高,而在第8~第10天则为反距离权重法准确率稍高,而双线性插值法准确率较低。对于山地站点,除了第1、第8和第10天是最近邻域法准确率较高以外均为反距离权重法准确率较高,而双线性插值法准确率明显低于前2种插值方法,反距离权重法准确率较双线性插值法高出4.5%~7.7%,说明双线性插值法不适用于山地站点。

从不同插值方法预报未来24 h最高气温准确率站点个数(见表1)可以看出,内陆站点使用双线性插值准确率高于80%的有13个站点,而最近邻域和反距离权重法仅有5个站点;准确率低于60%的站点,双线性插值仅有5个,而最近邻域和反距离权重法分别有8个和7个。沿海站点和山地站点均没有准确率高于80%的站点,由于站点个数较少,3种插值方法不能看出明显的差异。

内陆站点使用3种插值方法的最低气温准确率高于80%的站点个数分别为8个、10个和9个(见表2),而准确率小于60%的站点个数分别为12个、11个和13

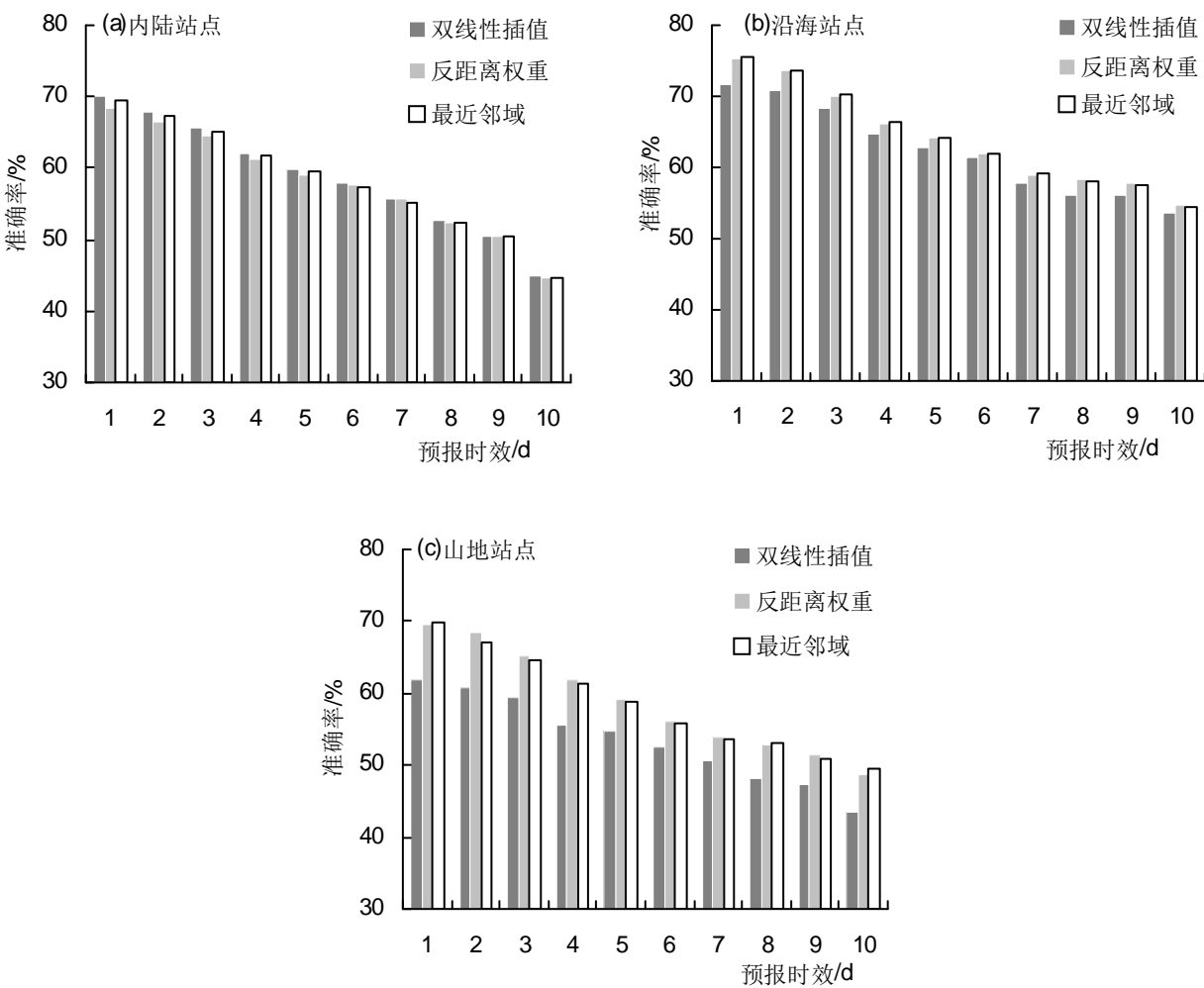


图4 3种插值方法在不同站点最低气温预报准确率

个,可看出双线性插值法准确率高的站点较多而低的站点较少,优于其他2种方法。沿海站点中3种插值方法的最低气温准确率均有高于80%的站点。对比各个准确率的站点个数可看出反距离权重和最近邻域法优于双线性插值法。山地站点中最近邻域法和反距离权重法准确率均有高于80%的站点,而双线性插值没有,并且双线性插值法准确率低于60%的站点有2个,另2种方法均只有1个站点,说明双线性插值法在山地站

点效果较差。
综上所述,内陆站点使用双线性插值方法准确率较高,即内陆地区适用双线性插值方法;沿海站点最高气温3种插值方法准确率差别不大,而最低气温使用最近邻域和反距离权重法差异较小但双线性插值法准确率较低,因此对于沿海地区可以考虑使用最近邻域法或反距离权重法;同样的,山地站点最低气温使用双线性插值法准确率明显低于其他2种插值方法,综合

表1 不同插值方法24 h最高气温准确率站点个数

准确率/%	内陆站点个数			沿海站点个数			山地站点个数		
	NN	BI	IDW	NN	BI	IDW	NN	BI	IDW
≥80	5	13	5	0	0	0	0	0	0
70~80	30	24	31	3	2	3	3	3	4
60~70	20	21	20	5	7	6	1	2	0
<60	8	5	7	3	2	2	3	2	3
合计	63	63	63	11	11	11	7	7	7

表2 不同插值方法24 h最低气温准确率站点个数

准确率/%	内陆站点个数			沿海站点个数			山地站点个数		
	NN	BI	IDW	NN	BI	IDW	NN	BI	IDW
≥80	8	10	9	3	3	4	1	0	2
70~80	28	25	22	6	3	5	1	4	2
60~70	15	17	19	2	3	2	4	1	2
<60	12	11	13	0	2	0	1	2	1
合计	63	63	63	11	11	11	7	7	7

考虑,山地地区较为适用反距离权重插值方法。

2.2 准确率月检验

由3种插值方法在3种站点类型的最高气温月预报准确率可知(见图5),不同插值方法预报准确率略有差别。总的来说,预报准确率在8—10月相对较高,而在3—6月较低。内陆站点3种插值方法差异很小,仅在4—7月及12月有些许差异。同样的,沿海站点除了在5—7月差异较大外,其余月份差异很小。而山地站点相对来说差异较大,1—5月和11—12月是双线性

插值方法较好,6—8月及10月为最近邻域插值法较好,9月为反距离权重法较好。

对于最低气温的预报准确率(见图6),3种站点类型均为1月准确率最低而7月准确率最高,夏季的准确率明显高于冬季。内陆站点3种插值方法差异非常小,沿海站点最近邻域和反距离插值法准确率差别非常小,而双线性插值法除了在7月准确率较高之外均低于另2种方法。山地站点3种插值方法差异较大,反距离权重法在1—7月、11和12月准确率最高,最近邻

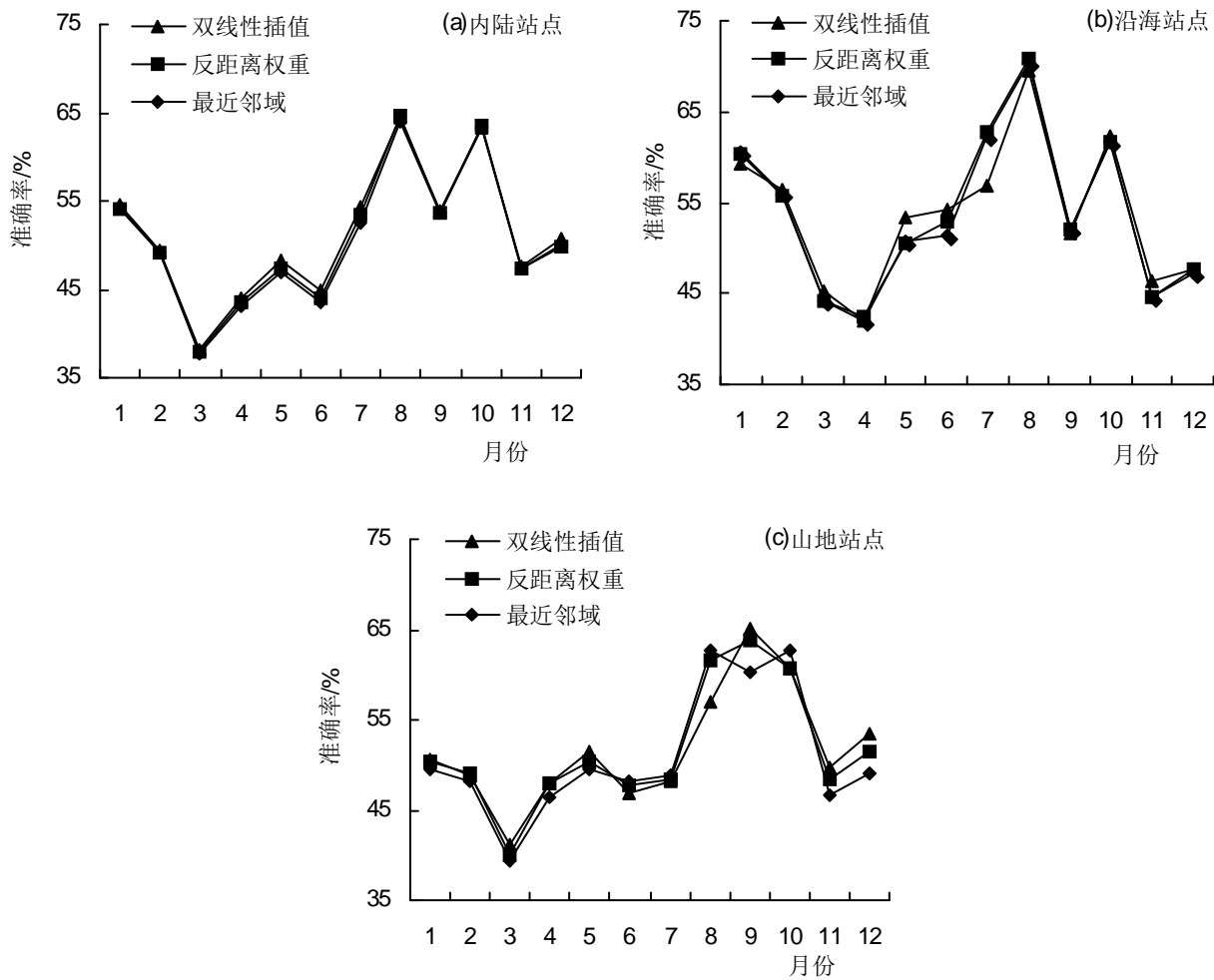


图5 3种插值方法在不同站点类型最高气温月预报准确率

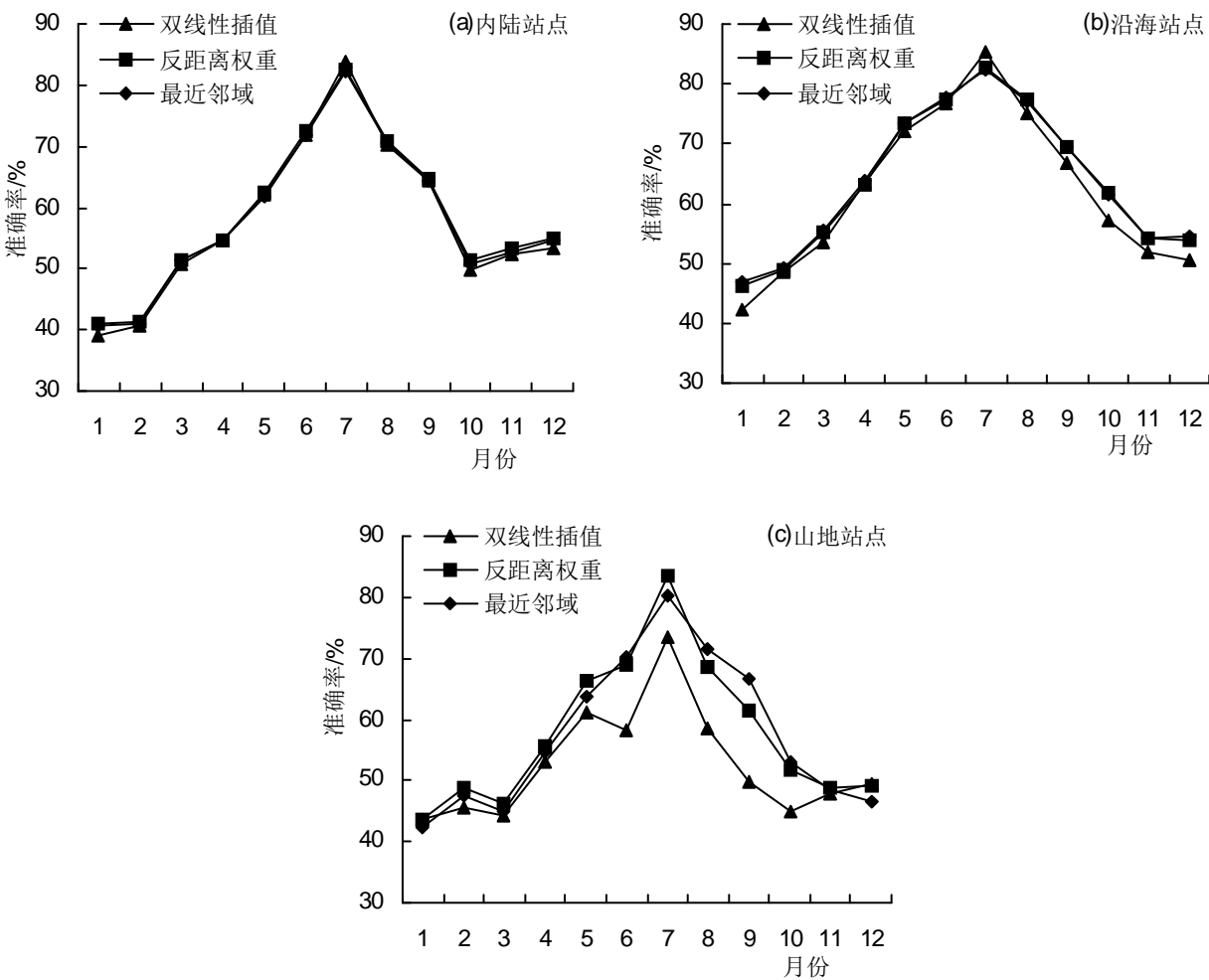


图6 3种插值方法在不同站点类型最低气温月预报准确率

域法在8—10月准确率最高,而双线性插值法准确率最低,尤其是在6—10月。

2.3 误差分布特点

为了进一步分析3种插值方法的误差分布,通过平均绝对误差和均方根误差2个方面考察其误差特

征。

由表3可见,内陆站点和沿海站点24、48、72 h的最高气温和最低气温3种插值方法的平均绝对误差均为2.0℃以内。对于内陆站点,最高、最低气温均是双线性插值法的平均绝对误差最小。沿海站点最高气温

表3 3种插值方法在不同站点类型最高气温和最低气温的平均绝对误差 ℃

站点类型	插值方法	最高气温			最低气温		
		24 h	48 h	72 h	24 h	48 h	72 h
内陆站点	最近邻域	1.5194	1.7021	1.9472	1.5286	1.5955	1.6718
	反距离权重	1.5060	1.6907	1.9351	1.5650	1.6185	1.6942
	双线性插值	1.4856	1.6826	1.9183	1.5105	1.5783	1.6556
沿海站点	最近邻域	1.5268	1.6644	1.7727	1.2082	1.2731	1.3802
	反距离权重	1.5278	1.6558	1.7680	1.2176	1.2785	1.3873
	双线性插值	1.5243	1.6541	1.7493	1.3054	1.3504	1.4478
山地站点	最近邻域	1.7255	1.9044	2.0811	1.6052	1.6902	1.7998
	反距离权重	1.6831	1.8502	2.0355	1.6237	1.7078	1.8029
	双线性插值	1.6813	1.8368	2.0365	1.8941	1.9560	2.0182

3种插值方法的平均绝对误差差异较小,最低气温的最近邻域法和反距离权重法差异较小而双线性插值法的平均绝对误差相对较大。山地站点的平均绝对误差较内陆站点和沿海站点更大,72 h的最高气温3种插值方法和72 h的最低气温双线性插值的平均绝对误差超过均2.0℃;最高气温反距离权重法和双线性插值法的平均绝对误差较为接近,而最近邻域法稍大;最低气温则是最近邻域法的平均绝对误差最小而双线性插值法最大。

对于均方根误差(见表4),内陆站点3种插值方法差别并不大,其中双线性插值的均方根误差较另两种小些;沿海站点最低气温3种插值方法的均方根误差均比最高气温小,最高气温的误差3种插值方法差别不大,而最低气温双线性插值法误差稍大;山地站点最高气温反距离权重的均方根误差最小,最低气温的最近邻域误差最小而双线性插值误差明显大于其他2种插值方法。

3 结论

表4 3种插值方法在不同站点类型最高气温和最低气温的均方根误差 ℃

站点类型	插值方法	最高气温			最低气温		
		24 h	48 h	72 h	24 h	48 h	72 h
内陆站点	最近邻域	2.0540	2.3027	2.5887	2.0751	2.1571	2.2484
	反距离权重	2.0349	2.2891	2.5725	2.1143	2.1817	2.2759
	双线性插值	2.0191	2.2839	2.5567	2.0519	2.1364	2.2272
沿海站点	最近邻域	2.2099	2.3656	2.4852	1.7419	1.8748	2.0063
	反距离权重	2.2163	2.3490	2.4768	1.7559	1.8871	2.0200
	双线性插值	2.2022	2.3418	2.4548	1.8633	1.9755	2.0805
山地站点	最近邻域	2.2166	2.4325	2.6368	2.0646	2.2026	2.3236
	反距离权重	2.1889	2.3914	2.5997	2.1085	2.2307	2.3493
	双线性插值	2.2123	2.4029	2.6331	2.4323	2.5298	2.6144

(1)对于最高气温的预报内陆站点准确率高于沿海和山地站点,而最低气温的预报准确率沿海站点高于内陆和山地站点。最高气温预报准确率在8—10月相对较高,而在3—6月较低。最低气温1月准确率最低而7月准确率最高,夏季的准确率明显高于冬季。

(2)对于内陆地区,双线性插值法的准确率高于最近邻域法和反距离权重法,且其平均绝对误差和均方根误差均小于最近邻域法和反距离权重法,内陆地区适用双线性插值方法。

(3)对于沿海地区,最高气温3种插值方法准确率差异较小,平均绝对误差和均方根误差差异也较小;最低气温最近邻域法和反距离权重法准确率、平均绝对误差和均方根误差差异较小,而双线性插值法准确率较低且误差相对较大,因此对于沿海地区可以考虑使用最近邻域法或反距离权重法。

(4)对于山地地区,最高气温反距离权重法和双线性插值法准确率较高,反距离权重误差最小而最近邻域法最大;最低气温反距离权重法和最近邻域法准确率明显高于双线性插值法,平均绝对误差和均方根误差最近邻域法最小,反距离权重法次之,双线性插值法最大。综合考虑,山地地区较为适用反距离权重插值

方法。

4 讨论

在农业发展过程中,精细化气象预报发挥着关键作用。青岛市建立了多个现代化农业产业园区,大力发展现代农业,如黄岛区蓝莓、崂山区樱桃、城阳区红杏、胶州大白菜等,迫切需要精细化气象服务的支撑和保障。通过不同区域适用不同的插值方法的研究,可以将预报产品分辨率从5 km提高至3 km,甚至1 km,甚至精细到具体地点,进行点对点精细服务,直接服务于农业产业园区,这样就解决了将气象部门发布的预报直接应用到农业园区而导致较大预报误差的问题。精细化气象预报能够有针对性地及时发布突发性的灾害预警信号,进而采取防御性措施,为农业生产防灾减灾、趋利避害提供科学指导。

参考文献

[1] 盛裴轩,毛节泰,李建国,等. 大气物理学[M]. 北京:北京大学出版社,2003:122-154.
[2] 薛志磊,张书余. 气温预报方法研究及其应用进展综述[J]. 干旱气象,2012,30(3):451-458.
[3] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J]. 应用气象学报,2015,26(1):1-11.

- [4] 韩荣青,包维虎,赵明华,等. 1961—2012年山东省气温变化及对农业热量条件影响[J]. 中国农学通报,2017(16):118-128.
- [5] 周威,王亚,方韵,等. 湘西州1960—2017年气候变化及对农业的影响[J]. 中国农学通报,2018,34(24):128-134.
- [6] 唐湘玲,刘姣娣,吕新. 石河子地区近48年来气候变化对棉花产量影响分析[J]. 中国农学通报,2010,26(20):324-329.
- [7] 邓振镛,王强,张强,等. 中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施[J]. 生态学报,2010,30(22):6278-6288.
- [8] 李彤霄,赵国强,李有. 河南省气候变化及其对冬小麦越冬期的影响[J]. 中国农业气象, 2009,30(2):143-146.
- [9] 陈勇,廖玉芳,郭东鑫,等. 长沙近41年气候变化对双季早稻产量的影响[J]. 中国农学通报,2012,29(14):167-173.
- [10] 廉丽姝,李为华,朱平盛. 山东省近40年气候变化特征[J]. 气象科技,2006,34(1):57-61.
- [11] 王海宾,范旭亮. 基于WebGIS技术的精细化格点预报系统设计与实现[J]. 大气科学研究与应用,2014(2):112-120.
- [12] 罗聪,曾沁,高亭亭,等. 精细化逐时滚动温度预报方法及检验[J]. 热带气象学报,2012,28(4):552-556.
- [13] 彭月,周盛,樊志超,等. 精细化预报产品在长沙的应用和温度检验[J]. 干旱气象,2015,33(5):867-873.
- [14] 刘长成,孙源,周显伟. 中央台精细化温度指导预报产品在齐齐哈尔市的检验[J]. 黑龙江气象,2014(2):18-19.
- [15] 王海宾,杨引明,范旭亮,等. 上海精细化格点预报业务进展与思考[J]. 气象科技进展,2016(4):18-23.
- [16] 戴翼,何娜,付宗钰,等. 北京智能网格温度客观预报方法(BJTM)及预报效果检验[J]. 干旱气象,2019,37(2):160-165.
- [17] 金君,彭思岭,刘启亮,等. 中国陆地区域气象要素空间插值方法比较研究[J]. 工程勘察,2010(11).
- [18] 陈峰峰,王光辉,沈学顺,等. Cascade插值方法在GRAPES模式中的应用[J]. 应用气象学报,2009,20(2):164-170.
- [19] 王丽娜. 气象要素空间插值算法的研究及其应用[D]. 重庆:重庆理工大学,2014.
- [20] 黄成荣,贾丽红,汤浩,等. 不同插值算法对GRAPES模式在乌鲁木齐地区的降水分级检验比较[J]. 沙漠与绿洲气象,2011,5(2):23-27.
- [21] Lu G Y, Wong D W. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique[J]. Computers and Geosciences,2008,34(9):1044-1055.
- [22] Ashraf M, Loftis J C, Hubbard K G. Application of geostatistics to evaluate partial weather station networks[J]. Agricultural and Forest Meteorology,1997,84(3/4):255-271.
- [23] 李新,程国栋,卢玲. 空间内插方法比较[J]. 地球科学进展,2000,15(3):260-265.
- [24] 林忠辉,莫兴国,李宏轩,等. 中国陆地区域气象要素的空间插值[J]. 地理学报,2002,57(1):47-56.
- [25] 陈锋,董美莹,冀春晓. 综合分析法在复杂地形气温精细格点化中的应用[J]. 高原气象,2016(5):1376-1388.
- [26] Bartier P M, Keller C P. Multivariate interpolation to incorporate thematic surface data using inverse distance weighting (IDW) [J]. Computers and Geosciences,1996,22(7):795-799.